

<https://doi.org/10.23913/ride.v15i29.2079>

Artículos científicos

***La biología molecular, su situación en la educación y el ejercicio
del médico veterinario en México***

***Molecular biology its situation in veterinary education and practice in
Mexico***

***Biologia molecular, sua situação na educação e prática da medicina
veterinária no México***

José Simón Martínez Castañeda

Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y
Zootecnia, Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal, México

jsmartinezcc@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8727-0307>

Valeria Jazmín Rodríguez Villavicencio

Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Amecameca, México

vrodriquezv292@alumno.uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0001-6677-6563>

Linda Guiliana Bautista Gómez*

Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Amecameca, México

lgbautistag@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0000-2399-5937>

*Autor para correspondencia

Resumen

La biología molecular está adquiriendo mayor relevancia en el campo de la medicina veterinaria. De hecho, cada vez son más las asignaturas, tanto en ciencias básicas como en ciencias aplicadas, que abordan el conocimiento de esta disciplina. Por ello, es necesario que el currículo de la carrera incluya cátedras como biología molecular o disciplinas afines, como la genómica o la biotecnología, “si las escuelas de esta profesión desean aprovechar las oportunidades emergentes y orientar su desarrollo hacia una formación que permita aportar soluciones a los problemas sociales que afectan a una sociedad global”. En esta revisión se exploran los orígenes de la educación veterinaria, el surgimiento y avance de la biología molecular, las herramientas tecnológicas generadas a partir de esta disciplina, su impacto social y económico y se discute su integración en la formación del médico veterinario actual.

Palabras clave: Educación, Medicina veterinaria, Biología, molecular, México.

Abstract

Molecular biology is gaining increasing relevance in the field of veterinary medicine. There are many subjects in basic sciences, medicine, and veterinary clinics where the knowledge of this discipline is applied; therefore, subjects such as molecular biology or related knowledge such as genomics or biotechnology must be involved in the curriculum of veterinary medicine students; “if the schools of this profession want to capitalize on the opportunities that are emerging in this field and direct its development towards a profession with the knowledge that allows providing solutions to the social problems that currently affect a society globally”. In this review, we address the origins of veterinary education, the birth, and progress of molecular biology, as well as the technological tools that have been generated from this discipline, the social and economic impact it has generated, and we also discuss its insertion in the training of the current veterinarian.

Keywords: Education, Veterinary medicine, Biology, Molecular, Mexico.

Resumo

A biología molecular está se tornando cada vez mais relevante no campo da medicina veterinária. Na verdade, há cada vez mais disciplinas, tanto nas ciências básicas como nas ciências aplicadas, que abordam o conhecimento desta disciplina. Portanto, é necessário que o currículo da carreira inclua cursos como biología molecular ou disciplinas afins, como genómica ou biotecnología, “se as escolas desta profissão pretendem aproveitar as oportunidades emergentes e direccionar o seu desenvolvimento para uma formação que lhes permita fornecer soluções. aos problemas sociais que afectam uma sociedade global” Por este motivo, esta revisão explora as origens da educação veterinária, o surgimento e avanço da biología molecular, as ferramentas tecnológicas geradas a partir desta disciplina, o seu impacto social e económico e, em seguida, discute a sua integração na formação dos médicos veterinários atuais.

Palabras-chave: educación, medicina veterinária, biología molecular, México.

Fecha Recepción: Mayo 2023

Fecha Aceptación: Agosto 2024

Introducción

De acuerdo con la Organización Mundial del Comercio, en lo que se refiere a las medidas sanitarias y fitosanitarias, “uno de los impactos más significativos de la globalización, lo constituye la necesidad de los estados de fortalecer sus servicios veterinarios oficiales para promover y proteger la salud animal y humana, y, al mismo tiempo, facilitar el comercio internacional” (Organización Panamericana de la Salud [OPS] y Association of American Veterinary Medical Colleges [AAVMC], 2007).

La palabra *veterinario* tiene una etimología controversial, pues, por un lado, se cree que proviene del latín *veterinarius*, que significa ‘relativo a las acémilas’ o animales de carga, pero también podría derivar de *vetus*, que significa ‘viejo’, en cuyo caso la etimología se referiría al cuidado de animales viejos. El primero en utilizar la palabra *veterinario* fue Lucio Junio Moderato Columela, un patricio romano del siglo I, quien la empleó para referirse al pastor que ejercía funciones propias del conocimiento en medicina animal (Díaz y Gerard, 2016).

Ahora bien, la importancia del papel social del veterinario se remonta al antiguo Egipto, Mesopotamia y la antigua Roma, donde ya existían personas dedicadas exclusivamente al cuidado de los animales destinados a la producción de alimentos,

vestimenta y carga, así como a la caballería de sus ejércitos. En el México prehispánico, las cartas de relación de Hernán Cortés sobre la conquista de México mencionan que entre los mexicas había hombres y mujeres dedicados a tratar las enfermedades de las aves. Al respecto, cabe recordar que antes de la llegada de los españoles, en Mesoamérica no existían ganado vacuno, equino, porcino, ovino o caprino. Sin embargo, había una intensa actividad de reproducción y crianza de mamíferos como el venado cola blanca y el perro, así como de aves como la guacamaya y el guajolote, entre otras especies. En los escritos de fray Bernardino de Sahagún se menciona que existía entre los mexicas el oficio de carnicero, vendedor de aves y huevos, y que ellos se encargaban de criar aves y cazar animales como el venado para ser consumidos por la población (Mendoza, 2015).

Posteriormente, en la Nueva España, los datos sobre el cuidado de los animales se encuentran en las obras de Suárez de Peralta, quien escribió un tratado sobre la caballería de la gineta y brida (impreso en Sevilla en 1580) y un libro de albeitería (escrito entre 1575 y 1580). Suárez de Peralta fue un experto en el manejo y cuidado de los caballos, así como en la cura de sus enfermedades, aplicando sus conocimientos de la herbolaria indígena (Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], 13 de diciembre de 2019).

En cuanto a la educación formal en el área de la medicina veterinaria, comenzó en Francia en el siglo XVIII, con la creación de la primera escuela de veterinaria en la ciudad de Lyon en 1762. Esta institución fue fundada gracias a la iniciativa del abogado Claude Bourgelat (1712-1779), quien, a través de su red de relaciones con el grupo de tecnócratas cercanos a la corte de Luis XV, logró que el monarca ordenara la apertura de la escuela. Después de la fundación de la escuela de Lyon, comenzaron a surgir otras en toda Europa, entre ellas la de Alfort, de donde egresó Eugenio Bergeyre, quien colaboró en la fundación de la carrera de veterinaria en el México del siglo XIX (Mendoza, 2015).

En México, la enseñanza profesional de la medicina veterinaria se fundó en 1853 por decreto del general Antonio López de Santa Anna. La carrera de Veterinario quedó establecida en la Escuela Nacional de Agricultura, ubicada en las instalaciones del antiguo hospicio de San Jacinto, en la Calzada Tacuba de la Ciudad de México (Decreto Ministerio de Fomento, sección 2, 1853). Sin embargo, esta solo perduró hasta 1914.

Dos años más tarde, se reabrió como la Escuela Nacional de Veterinaria; en 1918, se le añadió el término de Medicina. Esta institución estuvo adscrita a la Secretaría de Fomento y a la Secretaría de Instrucción Pública hasta 1929, año en que se incorporó a la UNAM. En 1949, se transformó en la Escuela Nacional de Medicina Veterinaria y Zootecnia.

Posteriormente, en 1969, la escuela se convirtió en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, ubicada en las instalaciones de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México (Cervantes y Román, 2010).

En respuesta al aumento en la demanda de la carrera, en 1957 se fundó la primera escuela de Medicina Veterinaria en provincia, ubicada en el estado de Veracruz. Actualmente, existen más de 50 instituciones en casi todos los estados del país que ofrecen la carrera de Médico Veterinario Zootecnista entre sus programas de estudio.

En México, en las universidades se otorgan el título de Médico Veterinario Zootecnista (MVZ), los profesionales egresan tras completar un programa de licenciatura de aproximadamente cinco años, con una formación que abarca aspectos médicos, salud pública veterinaria y producción animal. Sin embargo, el perfil actual con el que egresan los MVZ fue analizado y conceptualizado por la Asociación Panamericana de Ciencias Veterinarias (PANVET) en 1997. Este programa de estudios tiene casi 26 años desde su conceptualización y en 2013 la PANVET redefinió el “perfil del MVZ con visión al 2030”, donde se estableció que dichos especialistas deben contar con un perfil de competencias dividido en dos grandes grupos: generales y disciplinares.

Dentro de las primeras se incluyen aquellas complementarias al ejercicio profesional, entre las que se destacan la capacidad de pensamiento científico, es decir, la habilidad para buscar, analizar y sintetizar información científica, así como participar en proyectos de investigación básica o aplicada, siguiendo la metodología adecuada según el método científico. Además, deben ser capaces de emplear la metodología científica para identificar y solucionar problemáticas sociales, desarrollar nuevas tecnologías con los recursos disponibles, e innovar en el ámbito de la biotecnología.

En concordancia con este nuevo planteamiento, las escuelas de medicina veterinaria en México deberán actualizar sus planes de estudios, tomando como referencia una formación *ad hoc* que permita a los estudiantes adquirir este perfil de competencias desde el primer día de egreso (Zárate, 2016). Esto es esencial para que los profesionales de la medicina veterinaria en nuestro país se alineen con las tendencias globales de la profesión, tal como ha sido considerado por la Association of American Veterinary Medical Colleges, que sostiene que los médicos veterinarios deben estar preparados para resolver las problemáticas que emergerán en los próximos 20 años. En otras palabras, deben comprender y tener las habilidades necesarias para utilizar las tecnologías emergentes.

En tal sentido, se prevé que algunos de los posibles escenarios a los que se enfrentarán los veterinarios incluirán un mundo en el que las zoonosis pandémicas serán persistentes, por lo que deberán desarrollar los métodos y medidas necesarias para mitigar en gran medida las amenazas que estas enfermedades representan para la humanidad. Aunado a esto, deben estar capacitados para actuar en un mundo en el que el genoma de las especies animales sea explorado y aprovechado para la modificación genética, la clonación, el desarrollo de fármacos, la creación de mascotas genéticamente diseñadas y la producción *in vitro* de alimentos para el consumo animal. Igualmente, un planeta en el que el calentamiento global y sus consecuencias para las poblaciones de animales domésticos y silvestres cambien drásticamente los requisitos de atención médica y suministro de alimentos, lo que daría lugar a la aparición de nuevas enfermedades animales. En pocas palabras, es fundamental que los nuevos profesionales de la veterinaria adquieran, además de su formación disciplinar, conocimientos más específicos en áreas como la salud pública, la medicina de animales de laboratorio, la medicina de animales silvestres, la biotecnología y la investigación biomédica (Prasse *et al.*, 2007).

Por estos motivos, en las últimas décadas el conocimiento de la biología molecular ha ganado cada vez más relevancia en el campo de la medicina veterinaria a nivel mundial. Si en México queremos aprovechar esta tendencia, los conocimientos adquiridos en esta disciplina deben comenzar a reflejarse en el currículo de los veterinarios. Esto implica desarrollar nuevas asignaturas en los planes de estudio, relacionadas con áreas como la genética molecular, la genómica y la biotecnología médica. Además, los conceptos básicos de biología molecular deben ser ampliamente abordados en asignaturas que forman parte de la estructura del conocimiento básico de la licenciatura, como Biología Celular, Bioquímica, Genética, Virología y Biotecnología.

Explicado lo anterior, en la presente revisión se describen las aplicaciones actuales de la biología molecular en el campo de la medicina veterinaria y se discuten algunas de las dificultades asociadas con la enseñanza de esta disciplina en las escuelas de veterinaria de nuestro país.

Antecedentes

Los orígenes y progreso de la biología molecular

La biología molecular es una de las ramas más recientes de la biología, dedicada a explicar los factores, procesos y sistemas biológicos a nivel molecular. Como disciplina, también abarca las técnicas biofísicas y bioquímicas utilizadas para investigar fenómenos de origen molecular (Marion *et al.*, 2007).

Anteriormente, estos aspectos de los seres vivos se abordaban mediante disciplinas como la biología celular, la bioquímica y la genética, lo que explica que la biología molecular tenga sus bases en estas áreas. En 1865, Gregor Mendel descubrió las leyes de la herencia biológica, convirtiendo a la biología en una ciencia exacta, al igual que la física y la química. Las cuatro leyes básicas de la genética de Mendel, formuladas a partir de una meticulosa experimentación, provocaron una revolución en la biología, al proporcionar a los biólogos una base racional para cuantificar observaciones e investigar relaciones causa-efecto. Estas leyes fueron comparables a las leyes básicas de la termodinámica, lo que atrajo a muchos físicos a la biología. Un ejemplo es el físico alemán Max Delbrück, quien, tras investigar en astronomía y física cuántica, se trasladó a la biología para estudiar las reglas básicas de la herencia en organismos más simples, como los bacteriófagos (virus que pueden infectar bacterias) (Kellenberger, 2004).

A pesar de que Mendel había establecido las leyes de la herencia, la pregunta más importante era cómo se almacenaba la información genética en la célula. “Erróneamente”, el ADN no fue considerado seriamente, pues cómo se podía explicar que un heteropolímero de solo cuatro monómeros diferentes explicar las altas especificidades de los genes. En su lugar, las proteínas, con sus 20 diferentes aminoácidos, parecían más adecuadas para ser la estructura molecular que almacenaba la información genética. Sin embargo, fueron las investigaciones de Oswald Avery y su colaborador Maclyn McCarty las que demostraron que el ADN es el material de los genes y los cromosomas.

Los experimentos de Alfred Hershey y Martha Chase apoyaron aún más la idea de que el ADN es el portador de la información genética. A medida que las macromoléculas biológicas (ácidos nucleicos y proteínas) se convirtieron en el centro de la investigación, la biología y la bioquímica encontraron un punto de estudio común. Los investigadores de ambas disciplinas se enfocaron en el estudio de estas macromoléculas para investigar cómo

se almacena, transmite y traduce la información genética en fenotipos, lo que dio origen a una nueva disciplina denominada *biología molecular*.

Diversos investigadores en química, física y biología abordaron el estudio de la estructura del ADN, pero fue hasta 1953 cuando el físico británico Francis Crick y el biólogo estadounidense James Watson publicaron la famosa estructura de la doble hélice del ADN en un artículo de apenas una página en la revista *Nature*. Esta publicación estableció la forma y composición química del ADN y abrió las puertas a una gran cantidad de investigaciones para definir las bases del código genético (Travers y Muskhelishvili, 2015).

A partir de entonces, numerosos investigadores de distintas disciplinas concentraron sus esfuerzos en estudiar la expresión y regulación de los genes, lo que constituyó el inicio de una excepcional sucesión de descubrimientos en biología molecular durante las décadas de 1950 y 1960, entre los cuales se destacan el del código genético y el primer modelo de regulación de la expresión génica propuesto por François Jacob y Jacques Monod. De esta manera, el “gen” se convirtió en el foco de trabajo para un gran número de investigadores durante casi un siglo.

El descubrimiento de que varios genes codifican más de una proteína y que los retrovirus pueden sintetizar ADN utilizando el ARN como molde (transcripción inversa) cambió el paradigma de la biología molecular. A partir de este punto, diferentes grupos de investigadores se enfocaron en el estudio de la secuenciación de genes, la ingeniería genética y la integración del genoma.

No obstante, pasaron casi 20 años para que los conocimientos básicos de la biología molecular pudieran aplicarse a las tecnologías. Así, en las décadas de 1970 y 1980, la ingeniería genética experimentó un gran auge: en 1973 se patentó por primera vez en los Estados Unidos una técnica de recombinación genética; en 1977, se fabricó con éxito una hormona humana en una bacteria; en 1978, se clonó el gen de la insulina humana, y en 1982 se creó el “superratón” al insertar el gen de la hormona de crecimiento de una rata en óvulos fecundados de la hembra de un ratón.

El 14 de septiembre de 1990, la FDA aprobó por primera vez un ensayo de terapia génica con fines terapéuticos en humanos. Dos niños con deficiencia de adenosina desaminasa (ADA-SCID), una enfermedad monogenética que causa una inmunodeficiencia grave, fueron tratados con glóbulos blancos extraídos de su sangre y modificados *ex vivo* para expresar el gen normal que produce adenosina desaminasa (Wirth *et al.*, 2013).

Por su parte, en medicina veterinaria el primer animal producido por ingeniería genética fue un modelo para la enfermedad de la retinitis pigmentosa, realizado por Petters *et al.* (1997), este consistió en una línea de cerdos que contenía el gen de la rodopsina con una mutación P347L, lo que generó una enfermedad similar a la que se presenta en humanos. Asimismo, Wilmut y colaboradores anunciaron en 1996 el nacimiento de la oveja Dolly, primer animal de granja clonado (Campbell *et al.*, 2005).

Por otro lado, los avances en la secuenciación del ADN fueron notoriamente rápidos. En 1988 se creó la organización HUGO para llevar a cabo el proyecto del genoma humano, cuyo objetivo era identificar la secuencia total de nucleótidos en el genoma humano, estimado en ese momento en aproximadamente cincuenta a cien mil genes y tres mil millones de pares de bases (Olson, 1993). En febrero de 2001, dicho proyecto publicó sus resultados: una secuencia completa al 90 % de los tres mil millones de pares de bases en el genoma humano. El Consorcio del PGH publicó estos datos en el volumen del 15 de febrero de 2001 de la revista *Nature*. Poco después, en el volumen 438 del 8 de diciembre de 2005 de la misma revista, se publicó el genoma canino, mientras que el del bovino fue el primer animal de granja cuyo genoma completo se secuenció y publicó en el volumen 324 de la revista *Science* en 2009. En la actualidad, todos los genomas de las especies domésticas han sido publicados.

El avance en la secuenciación de genomas fue significativamente impulsado por el descubrimiento de la PCR (Polymerase Chain Reaction). En 1986, Mullis y colaboradores publicaron un método para la amplificación enzimática de secuencias específicas de ADN, que permitió identificar secuencias cortas y altamente específicas dentro de los 3300 millones de pares de bases que constituyen el genoma humano, y realizar *in vitro* millones de copias de estos fragmentos pequeños de ADN para su aislamiento físico (Mullis, 1989).

Entre los diversos usos de la PCR uno de los más destacados fue su aplicación en el diagnóstico de un sinnúmero de enfermedades, tanto en humanos como en animales. Hoy en día, sin duda, es la técnica más utilizada para la identificación de virus, bacterias y otros microorganismos (Figura 1).

Ahora bien, cabe resaltar que la biología molecular, la biotecnología y la genómica no se hubieran podido comprender sin el uso de la bioinformática, ya que el empleo de computadoras se ha vuelto omnipresente en biología, así como en la mayoría de las ciencias naturales (física, química, matemáticas, criptografía, etc.). Sin embargo, curiosamente, solo la biología tiene un término específico para referirse al uso de las computadoras en esta

disciplina: “bioinformática”. Esto puede deberse a que el uso de computadoras en biología requirió una comprensión particular de la estructura de las macromoléculas (ácidos nucleicos y proteínas), lo cual llevó a la biología a informatizarse más tarde que otras ciencias “duras” como la física y las matemáticas. No es sorprendente, considerando que las primeras computadoras fueron diseñadas específicamente para resolver cálculos matemáticos en el campo de la física. En la actualidad, se cree que la bioinformática moderna surgió recientemente para apoyar el análisis de datos de secuenciación de genomas.

Sin embargo, los inicios de la bioinformática se remontan a hace más de 50 años, cuando aún no se había secuenciado el ADN. Los fundamentos de esta disciplina se establecieron a principios de la década de 1960 con la aplicación de métodos computacionales para el análisis de secuencias de proteínas, incluyendo el montaje de secuencias de *novo* (bases de datos de secuencias biológicas y modelos de sustitución).

Más tarde, el análisis de ADN también comenzó a desarrollarse gracias a avances paralelos en (i) métodos de biología molecular, que permitieron una manipulación más fácil del ADN y su secuenciación, y (ii) ciencias de la computación, que vio el surgimiento de computadoras cada vez más miniaturizadas y poderosas, así como nuevos *softwares* más adecuados para manejar tareas de bioinformática.

Desde la década de 1990 hasta la de 2000, se produjeron importantes mejoras en la tecnología de secuenciación y una reducción en los costos, lo que llevó a un aumento exponencial de datos. De hecho, la llegada del *big data* presentó nuevos desafíos en términos de búsqueda y gestión de datos, lo cual demandó una mayor experiencia informática en el campo. Junto con la creciente cantidad de herramientas bioinformáticas, el *big data* biológico tiene (y sigue teniendo) profundas implicaciones en el poder predictivo y la reproducibilidad de los resultados bioinformáticos. Para enfrentar este problema, las universidades están integrando completamente esta disciplina en el plan de estudios de los estudiantes de biología. Subdisciplinas recientes como la biología sintética, la biología de sistemas y el modelado de células completas han surgido de la creciente complementariedad entre las ciencias de la computación y la biología (Gauthier *et al.*, 2019).

Los avances tecnológicos mencionados anteriormente han dado lugar a nuevos campos de investigación conocidos actualmente como “ómicas”, que se refieren al estudio integral de las relaciones y acciones de varios tipos de moléculas en las células de un organismo. Comenzando con la genómica, el desarrollo de nuevas tecnologías de

secuenciación ahora permite la secuenciación rápida y rentable de un genoma completo y el estudio de todos los genes simultáneamente, en lugar de analizar gen por gen.

Además de la genómica, se han desarrollado una gama de tecnologías ómicas, que incluyen la transcriptómica (el estudio de la expresión de todos los genes en una célula u organismo), la proteómica (el análisis de todas las proteínas), la metabolómica (el análisis integral de todas las moléculas pequeñas) y la epigenómica (el estudio de la regulación epigenética de todo el genoma), entre otras. También han surgido otros términos ómicos como lipidómica, metagenómica, glucómica, conectómica, celómica e incluso foodómica (Olivier *et al.*, 2019).

Vale mencionar que, dado que una discusión detallada de estas tecnologías ómicas excede el enfoque de esta revisión, no abordaremos las aplicaciones individuales de estas tecnologías en la medicina humana y veterinaria.

El impacto socioeconómico de la biología molecular

La inversión en la innovación y desarrollo de tecnologías debe ser una prioridad para los países que desean participar en la competencia de la economía global. Por ejemplo, el proyecto del genoma humano tuvo un impacto económico de 966 000 millones de dólares y generó 59 000 millones de dólares en ingresos por impuestos federales en EE. UU., según un estudio de United for Medical Research y Battelle¹.

Por su parte, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), en su reporte sobre bioeconomía 2030, señala que la genómica será un gran motor económico en los próximos 20 años y recomienda establecer políticas públicas que estimulen y orienten la innovación en ciencias de la vida como un nuevo motor de la economía global. Asimismo, el Instituto Global McKinsey, en su reporte de mayo de 2013, clasifica a la genómica como una tecnología disruptiva que cambiará el mundo tanto o más que las computadoras, y pronostica un impacto económico global de trillones de dólares anuales para 2025.

Además, la investigación científica relacionada con el proyecto genómico generó cerca de 53 000 empleos directos, lo que resultó en más de 293 000 millones de dólares en salarios. Estos datos subrayan cómo una rama tecnológica derivada del conocimiento básico

¹ <https://unitedformedicalresearch.org/wp-content/uploads/2013/06/The-Impact-of-Genomics-on-the-US-Economy.pdf>

de la biología molecular ha sido enormemente beneficiosa para los países que invirtieron en el desarrollo de la genómica.

Aunque México no participó en el desarrollo del proyecto del genoma humano, un investigador mexicano presidió el comité de genómica y bioeconomía de este proyecto, lo cual vincula a nuestro país con la escena de la genómica. Nuestro país, por tanto, debe enfocarse en transformarse en una economía basada en el conocimiento y desarrollo tecnológico, al igual que los países miembros de la OCDE, que generan su riqueza y empleos en industrias de alto impacto tecnológico, como la biotecnología.

Al respecto, se estima que la industria basada en el conocimiento contribuye a más de la mitad del PIB en las principales economías de la OCDE, y las tendencias globales indican que las economías emergentes con infraestructura adecuada y recursos humanos competitivos, como México, pueden incorporar la genómica como un elemento clave para su prosperidad y crecimiento económico.

La biotecnología contribuye significativamente a la salud de las poblaciones humanas y animales, en lo que se conoce como “una sola salud”. Ejemplos de esto incluyen la generación de vacunas de nueva generación, alimentos mejorados con alto rendimiento y valor nutricional, y el desarrollo de la farmacogenómica, que permite una medicina personalizada basada en las características genómicas de los pacientes. Formar parte de la economía del conocimiento es esencial en una economía globalizada y competitiva, donde la capacidad de traducir el conocimiento científico y tecnológico en aplicaciones prácticas para el mercado es crucial. En el caso de México, el país tiene un notable potencial para integrar exitosamente la biotecnología en su estrategia económica, lo cual puede conseguir aprovechando su capacidad para desarrollar y aplicar tecnologías innovadoras en beneficio de la salud pública y el crecimiento económico.

En las últimas décadas, México ha avanzado significativamente en el desarrollo de las ciencias genómicas. En tal sentido, la creación de infraestructura clave, como el Instituto Nacional de Medicina Genómica, el Laboratorio Nacional de Genómica y Biodiversidad y el Centro de Ciencias Genómicas, junto con la formación de recursos humanos calificados, ha sido fundamental. Sin embargo, el país necesita una política de Estado moderna y robusta que promueva la inversión sostenida en ciencia y tecnología, así como la generación de expertos en el área para garantizar la transferencia efectiva del conocimiento científico y tecnológico al sector productivo y para fortalecer la competitividad global, y asegurar su crecimiento económico y bienestar social y cultural (Jiménez, 6 de julio de 2013).

Aplicaciones de la biología molecular en el desarrollo tecnológico en las ciencias veterinarias

El conocimiento básico de la biología molecular aplicado a la medicina veterinaria se ha enfocado principalmente en los llamados “animales genéticamente modificados” con el objetivo de obtener animales que presenten mejores adaptaciones a los ambientes, una mayor eficiencia alimenticia, alta producción y resistencia a enfermedades.

La población mundial, que actualmente es de aproximadamente siete mil millones, continúa creciendo, especialmente en los países con economías desarrolladas. Se espera que, para el año 2050 alcance los nueve mil millones de habitantes, por lo que la producción de alimentos deberá duplicarse para satisfacer la demanda global. Dado que los sistemas convencionales de agricultura y ganadería no serán suficientes, la generación de animales genéticamente modificados se presenta como una solución innovadora para el problema de la seguridad alimentaria mundial. Sin embargo, para que esto se materialice es necesario un mayor compromiso por parte de las universidades para desarrollar una nueva estructura en la educación y en el ejercicio profesional de los veterinarios.

Al respecto, existen muchos ejemplos en los cuales el desarrollo de la biología molecular y sus tecnologías tienen aplicación en la era moderna de la medicina veterinaria:

- Selección del sexo en las industrias láctea y de producción de huevo: Permite la crianza dirigida principalmente de hembras, eliminando la necesidad de castración y/o destrucción de machos.
- Generación de cerdas transgénicas: Se obtienen camadas de lechones con una mayor tasa de supervivencia y crecimiento, lo que aumenta la producción de carne de cerdo.
- Cerdos transgénicos: Producen predominantemente ácidos grasos omega-3, en lugar de la variedad omega-6 que es nutricionalmente menos valiosa.
- Cerdos genéticamente modificados: Excretan el 75 % menos de fósforo en el ambiente.
- Cerdos transgénicos con órganos para xenotrasplantes: Ofrecen una alternativa a la terapia con células madre.
- Vacas transgénicas con glándulas mamarias: Expresan antibacterianos contra los principales agentes infecciosos causantes de mastitis.
- Animales transgénicos (a menudo vacas y cabras): Funcionan como biorreactores, pues pueden producir en su leche moléculas terapéuticas específicas para

enfermedades, que servirían como terapias para humanos u otras especies. Esta tecnología ofrece esperanza como profiláctico para muchas enfermedades infecciosas entéricas en niños, especialmente en países de economías emergentes como México (McColl *et al.*, 2013).

- En el campo de la biomedicina veterinaria: Se han desarrollado modelos animales de enfermedades humanas para el estudio de la fibrosis quística, diabetes, enfermedades cardiovasculares, cáncer, enfermedad de Huntington, enfermedad de Alzheimer, enfermedad de Parkinson, esclerosis lateral amiotrófica, ataxia-telangiectasia, distrofia muscular de Duchenne, enfermedad renal poliquística, hemofilia tipo A, retinitis pigmentosa, albinismo, inmunodeficiencias, entre otras (tabla 1) (Rogers, 2016).
- El desarrollo de los anticuerpos monoclonales: Ha favorecido enormemente la aplicación de técnicas inmunológicas en la investigación de la bioquímica y la genética, y sobre todo en el diagnóstico de un gran número de enfermedades infecciosas, tanto virales como bacterianas, en todas las especies animales (Ciftci y Trovitch, 2000).

Tabla 1. Modelos animales desarrollados para el estudio de enfermedades genéticas en humanos

Enfermedad humana	Modelo animal	Gen modificado
Fibrosis quística	Cerdo doméstico	CFTR-nulo
Diabetes	Cerdo doméstico Cerdo doméstico	Contiene un transgen GIPR dominante negativo Contiene un transgen HNF-1 α dominante negativo
Enfermedades cardiovasculares	Cerdo miniatura de Yucatán Cerdo miniatura de Yucatán Cabra	Contiene un transgen PCSK9 dominante negativo LDLR- nulo Contiene un transgen TGF- β 1 humano
Cáncer	Cerdo doméstico, cerdo miniatura de Yucatán	TP53-R167H, KRAS-G12D
Enfermedad de Huntington	Oveja, cerdo miniatura del Tíbet, Cerdo miniatura del Liběchov	Contienen un transgen HTT- humano
Enfermedad de Alzheimer	Cerdo miniatura de Göttingen	Contiene un transgen APP695sw humano
Enfermedad de Parkinson	Cerdo miniatura de Bama	PARK2- and PINK1-nulo
Esclerosis lateral amiotrófica	Cerdo miniatura del Tíbet, cerdo miniatura de Yucatán	Contiene un transgen SOD1-G93A humano

Ataxia-telangiectasia	Cerdo miniatura de Minnesota, cerdo miniatura de Yucatán	ATM-nulo
Distrofia muscular de Duchenne	Cerdo doméstico	DMDex52delección
Enfermedad renal poliquística	Cerdo chino	PKD1-nulo
Hemofilia tipo A	Cerdo doméstico	FVIII-nulo
Retinitis pigmentosa	Cerdo miniatura NIH	Contiene un transgen RHO-P23H humano
Albinismo	Cerdo miniatura de Bama	TYR-nulo
Inmunodeficiencias	Cerdo doméstico Cerdo miniatura de Bama, cerdo miniatura de Minnesota	IL2RG-nulo RAG1/RAG2-nulo RAG2-nulo

Fuente: Elaborada a partir de Rogers (2016)

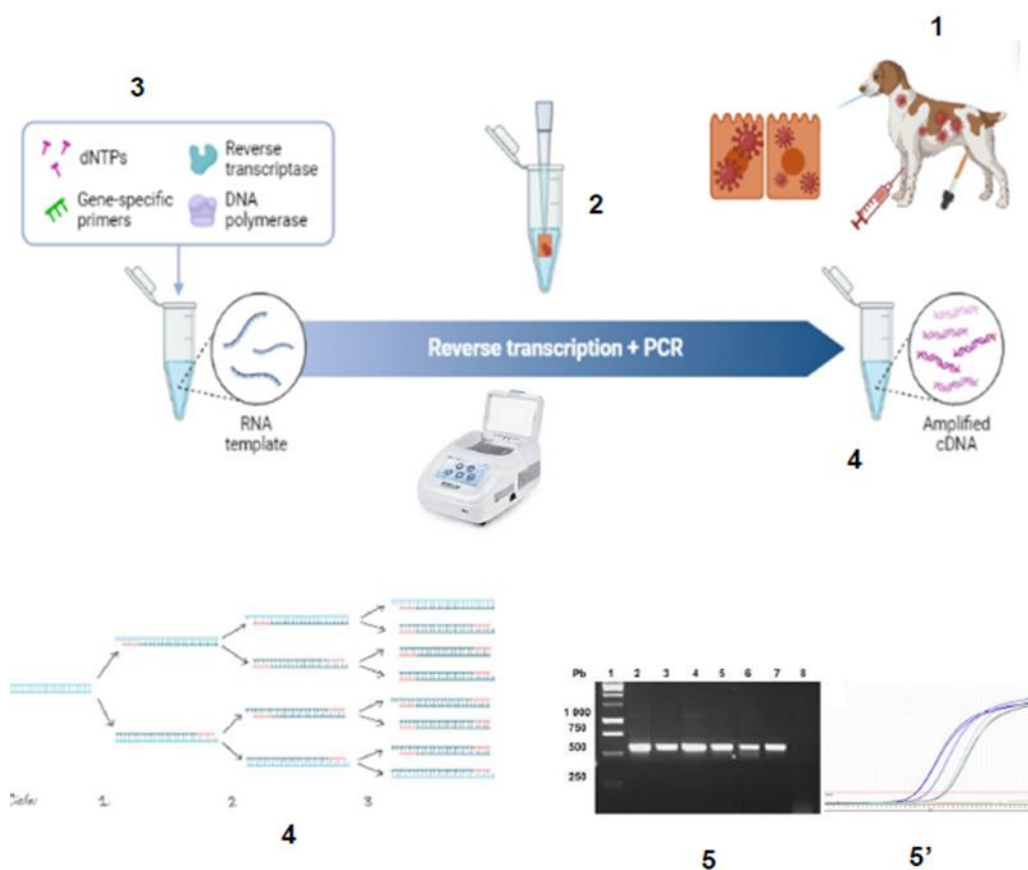
Sin lugar a dudas, el descubrimiento derivado de la biología molecular que ha tenido el mayor impacto en la biotecnología y ha repercutido ampliamente en la sociedad es la PCR. Esta técnica se ha difundido en todas las áreas de investigación y es ahora parte del desarrollo económico del país. Por ejemplo, la PCR de transcripción inversa en tiempo real es el estándar de oro para los diagnósticos de SARS-CoV-2, así como para muchas otras enfermedades infecciosas y genéticas que afectan tanto a humanos como a animales domésticos.

En la actualidad, la PCR es un sistema de diagnóstico sencillo, rápido y económico, y su evolución permitirá sin duda la interacción con otras tecnologías en desarrollo, como el internet de las cosas y la inteligencia artificial. En un futuro cercano, podremos ver cómo muestras microscópicas, incluso aquellas que contienen únicamente el RNA de una sola célula, podrán ser amplificadas y analizadas en sistemas tecnológicos como un *smartphone*.

En este escenario, el sistema Android podría procesar los datos y, a través de una red inalámbrica, enviarlos a un centro de referencia de enfermedades para mejorar el registro y

el diagnóstico preciso para el control de las enfermedades (Zhu *et al.*, 2020). Un esquema del principio básico de esta tecnología se presenta en la figura 1.

Figura 1. Aspectos básicos del procedimiento de la PCR reverso-transcripción para el diagnóstico de enfermedades virales producidas por virus con genoma de RNA



Nota: 1) Se muestra el tipo de muestra que se puede recolectar del animal infectado y también células epiteliales infectadas por un virus. 2) Procedimiento de purificación del RNA viral. 3) Reactivos necesarios para realizar la PCR reverso-transcripción que se colocan junto con el RNA viral y son procesados en un termociclador para llevar a cabo la amplificación de la región genómica seleccionada del virus. 4) La región genómica seleccionada se replica en forma exponencial y al final del proceso se logran obtener billones de copias como se observa en el 4bis. 5) Los fragmentos amplificados se puede visualizar en electroforesis utilizando geles de agarosa utilizando colorantes intercalados en las moléculas del DNA amplificado y luz ultravioleta (PCR punto final) o como en 5' utilizando sondas marcadas con un fluoróforo y donde el mismo termociclador detecta la

señal emitida por los fluoróforos conforme se va realizando la amplificación y lo muestra en una cinética a través de una computadora (PCR tiempo real).

Fuente: Elaboración propia

Metodología

Integrando la biología molecular a el currículo de la educación veterinaria

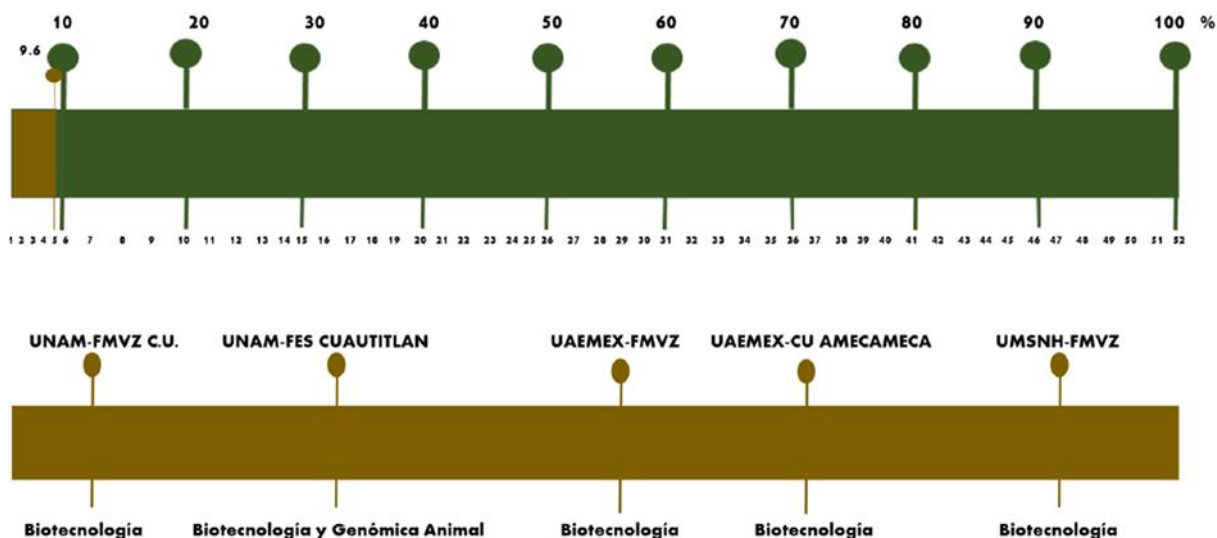
Para determinar la inclusión de la biología molecular o áreas afines a esta asignatura en la educación veterinaria en México, analizamos el plan de estudios de 52 universidades que imparten la carrera de medicina veterinaria y zootecnia en el país.

Resultados

En el análisis se observó que solamente en 5 (9.6 %) universidades se han incorporado materias relacionadas con la biología molecular. La Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM (FES-Cuautitlán UNAM) ofrece dos materias relacionadas: Biotecnología y Genómica Animal. Por su parte, la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la UNAM en Ciudad Universitaria imparte únicamente la materia de Biotecnología. De manera similar, la FMVZ de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), el Centro Universitario de Amecameca de la misma universidad y la FMVZ de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) solo ofrecen la materia de Biotecnología (figura 2).

En otras palabras, se puede señalar que los esfuerzos realizados por las entidades académicas para incorporar una de las áreas de las ciencias con mayor desarrollo en la actualidad han sido mínimos, lo cual, con mucha seguridad, se reflejará en la formación de sus egresados tanto en la actualidad como en el futuro.

Figura 2. Situación actual de las implicaciones de la enseñanza de la biología molecular y asignaturas afines en las distintas escuelas de medicina veterinaria del país



Nota: La barra verde representa el porcentaje de escuelas analizadas, mientras que la barra dorada incrustada representa el 9.6 % de escuelas que imparten en la licenciatura una o más materias con especialización en biología molecular, genómica o biotecnología. La barra dorada amplificada especifica las cinco escuelas que imparten estas materias en su plan de estudios de la licenciatura.

Fuente: Elaboración propia

Discusión

En este trabajo se analiza el impacto que se le ha dado a la biología molecular dentro de la educación veterinaria en México. La situación de esta disciplina en los programas de estudio de las diferentes escuelas y facultades de medicina veterinaria demuestra un escaso interés por parte de las autoridades educativas correspondientes. Menos del 10 % de estas instituciones ha tomado la iniciativa de incorporar estas disciplinas a sus planes de estudio, lo que deja en clara desventaja a los estudiantes recién egresados para competir en la industria que desarrolla productos, sistemas de diagnóstico y terapéuticos en el campo de la biología molecular y la medicina genómica.

Además, dado que el conocimiento y la economía global están cambiando de manera rápida, es imprescindible que los profesionistas recién egresados cuenten con las capacidades y herramientas necesarias para adaptarse a estos nuevos entornos laborales. Se espera, por ende, que los nuevos graduados posean conocimientos suficientes para actuar eficazmente

en entornos holísticos y en constante cambio, ya que enfrentarán muchos temas emergentes, como nuevas tecnologías de diagnóstico, nuevas modalidades de terapias farmacológicas y antimicrobianas, y nuevas formas de producción de alimentos basadas principalmente en la biotecnología. Por ello, los futuros egresados deben tener suficientes oportunidades de aprendizaje para desarrollarse en áreas biomédicas, genómicas y biotecnológicas (Prasse *et al.*, 2007).

En la formación básica del estudiante de medicina veterinaria, la biología molecular es relevante para una amplia gama de materias dentro del plan de estudios, como Biología celular, Fisiología, Embriología, Bioquímica, Genética, Virología, Patología, Microbiología, Parasitología, Inmunología, Nutrición, Farmacología y Diagnóstico Clínico, entre otras. Dado que muchos aspectos de la biología molecular pueden parecer redundantes para los estudiantes, es necesario que los docentes se enfoquen en las definiciones y términos básicos de la biología molecular y demuestren su aplicación en problemas reales del campo clínico de la medicina veterinaria.

Es probable que, dependiendo del área en el que se haya desarrollado el educador veterinario encontremos algunos problemas para incrustar los conocimientos de la biología molecular en las diferentes áreas de enseñanza básica y enseñanza aplicada de la licenciatura del médico veterinario. Por ejemplo, si el educador se desarrolló en el área científica, y no tiene experiencia en los aspectos clínicos, entonces podría no tener los contextos para explicar las aplicaciones de la biología molecular en resolver problemas clínicos. En cambio, si el educador solo se ha especializado en aspectos clínicos, podría no tocar con profundidad los conocimientos necesarios de la biología molecular en cada una de las áreas mencionadas, las cuales forman parte de la formación del estudiante de medicina veterinaria.

Conclusión

En conclusión, se requiere que las escuelas de medicina veterinaria aseguren que su personal docente esté compuesto por médicos veterinarios con formación especializada en clínica y con formación en investigación con un fuerte componente biomédico o molecular. Esto puede ayudar a cerrar la brecha entre la clínica y la ciencia básica. Con esta acción, no solo se aumentará la conciencia y el conocimiento de la biología molecular entre los médicos veterinarios, sino que también se fomentará la comunicación entre el personal docente en el área clínica y el de ciencias básicas.

En síntesis, la colaboración a través de la investigación proporcionará a ambas partes una visión más holística de la biología molecular aplicada a la medicina veterinaria, lo que impactará positivamente tanto en el contenido de la enseñanza como en la práctica profesional del médico veterinario.

Futuras líneas de investigación

El estudio de la biología molecular en el ámbito veterinario no es una moda ni una tendencia pasajera, sino un avance en ciencia y tecnología que seguirá creciendo. Por lo tanto, es vital incluir su estudio en la formación de las nuevas generaciones de médicos veterinarios para que puedan aplicar estos conocimientos en su desarrollo profesional.

Financiación

Esta investigación fue financiada por el Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (Comecyt), con el proyecto DICDTEM-2023-137, “Asociación molecular a resistencia farmacológica de patógenos con potencial zoonótico para el desarrollo de un nanosensor” de la convocatoria REDES-COMECYT, EDO MEÉX-2022.

Referencias

- Campbell, K., Alberio, R., Choi, I., Fisher, P., Kelly, R., Lee, J-H. and Maalouf, W. (2005). Cloning: eight years after Dolly. *Reproduction Domestic Animals*, 40(4), 256-68. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2005.00591.x>
- Cervantes, J. y Román, A. (2010). Historia de la Escuela Nacional de Medicina Veterinaria vista a través de sus directores I. *Expresiones Veterinarias*. <https://www.expresionesveterinarias.com/2010/08/historia-de-la-escuela-nacional-de.html>
- Ciftci, K. and Trovitch, P. (2000). Applications of genetic engineering in veterinary medicine. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 43(1), 57-64. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(00\)00077-6](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(00)00077-6)
- Decreto Ministerio de Fomento. Sección 2. El siglo diez y nueve. 7 de septiembre de 1853. Ciudad de México, México. <https://fmvz.unam.mx/sanjacinto/Decreto.pdf>
- Díaz, P. y Gerard, G. (2016). *Etimología de la palabra veterinario*. XIII Congreso Iberoamericano de Historia de la Veterinaria: 100 años de historia de la Veterinaria en León. <https://www.veterinariargentina.com/revista/2016/12/etimologia-de-la-palabra-veterinario/>
- Gauthier, J., Vincent, A., Charette, S. and Derome, N. (2019). A brief history of bioinformatics. *Brief of Bioinformatics*, 20(6) 1981-1996. <https://doi.org/10.1093/bib/bby063>
- Jiménez, G. (6 de julio de 2013). El impacto de la genómica en la economía de la salud. *Siempre presencia de México*. <http://www.siempre.mx/2013/07/el-impacto-de-la-genomica-en-la-economia-de-la-salud/>
- Kellenberger, E. (2004). The evolution of molecular biology. *EMBO Reports*, (5) 546-9. <https://doi.org/10.1038/sj.embor.7400180>
- Marion, T., Ryan, M. and Sweeney, T. (2007). Integrating molecular biology into the veterinary curriculum. *Journal of Veterinary Medical Education*, 34(5), 658-73. <https://doi.org/10.3138/jvme.34.5.658>
- McColl, K., Clarke, B. and Doran, T. (2013). Role of genetically engineered animals in future food production. *Australian Veterinary Journal*, 91(3), 113-117. <https://doi.org/10.1111/avj.12024>

- Mendoza, U. (2015). La invención de los animales: una historia de la veterinaria mexicana, siglo XIX. *História, Ciências, Saúde – Manguinhos, Rio de Janeiro*, 22(4), 1391-1409. <https://doi.org/10.1590/S0104-59702015000400010>
- Mullis, K. (1989). The polymerase Chain Reaction: Why it Works in (polymerase Chain Reaction). In *Current Communications in molecular biology* (pp. 237-243).
- Olivier, M., Asmis, R., Hawkins, G., Howard, T., Cox, L. (2019). The Need for Multi-Omics Biomarker Signatures in Precision Medicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19), 4781. <https://doi.org/10.3390/ijms20194781>
- Olson, M. (1993). The human genome project. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 90(10), 4338-44. <https://doi.org/10.1073/pnas.90.10.4338>
- Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Association of American Veterinary Medical Colleges (AAVMC) (2007). *Visión del futuro de la educación médica veterinaria*.
https://fmvz.unam.mx/fmvz/principal/archivos/Vision_Futuro_%20Educacion_Veterinaria.pdf
- Petters, R., Alexander, C., Wells, K., Collins, E., Sommer, J., Blanton, M., Rojas, G., Hao, Y., Flowers, W., Banin, E., Cideciyan, A., Jacobson, S. and Wong, F. (1997). Genetically engineered large animal model for studying cone photoreceptor survival and degeneration in retinitis pigmentosa. *Nature Biotechnology*, (15) 965-70. <https://doi.org/10.1038/nbt1097-965>
- Prasse, K., Heider, L. and Maccabe, A. (2007). Envisioning the future of veterinary medicine: the imperative for change in veterinary medical education. *Journal American Veterinary Medical Association*, 231(9) 1340-2. <https://doi.org/10.2460/javma.231.9.1340>
- Rogers, Ch. (2016). Genetically engineered livestock for biomedical models. *Transgenic Research*, 25, 345-3459. <https://doi.org/10.1007/s11248-016-9928-6>
- Travers, A. and Muskhelishvili, G. (2015). DNA structure and function. *The FEBS Journal*, 282(12), 2279-95. <https://doi.org/10.1111/febs.13307>
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (13 de diciembre de 2019). *Historiografía mexicana volumen II. La creación de una imagen propia. La tradición española tomo 1. Historiografía civil*. Instituto de Investigaciones Históricas.

https://historicas.unam.mx/publicaciones/publicadigital/libros/317_02_01/historiografia_civil.html

Wirth, T., Parker, N. and Ylä-Herttuala, S. (2013). History of gene therapy. *Gene*, 525(2) 162-9. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2013.03.137>

Zárate, J. (2016). *Competencias al primer día de egreso*. Asociación Mexicana de Escuelas y Facultades de Medicina Veterinaria y Zootecnia <http://fmvz.uas.edu.mx/archivos/Perfil%20de%20egreso%20del%20MVZ%20al%20dia%20siguiente.pdf>

Zhu, H., Zhang, H., Xu, Y., Laššáková, S., Korabečná, M. and Neužil, P. (2020). PCR past, present and future. *Biotechniques*, 69(4) 317-325. <https://doi.org/10.2144/btn-2020-0057>

Rol de Contribución	Autor (es)
Conceptualización	José Simón Martínez Castañeda (Igual) Linda Guiliana Bautista Gómez (Igual)
Metodología	José Simón Martínez Castañeda (Principal) Valeria Jazmín Rodríguez Villavicencio (Que apoya)
Software	No aplica
Validación	José Simón Martínez Castañeda (Igual) Valeria Jazmín Rodríguez Villavicencio (Igual) Linda Guiliana Bautista Gómez (Igual)
Análisis Formal	José Simón Martínez Castañeda (Igual)
Investigación	José Simón Martínez Castañeda (Igual) Valeria Jazmín Rodríguez Villavicencio (Igual) Linda Guiliana Bautista Gómez (Igual)
Recursos	José Simón Martínez Castañeda (Igual) Valeria Jazmín Rodríguez Villavicencio (Igual) Linda Guiliana Bautista Gómez (Igual)
Curación de datos	José Simón Martínez Castañeda (Igual) Valeria Jazmín Rodríguez Villavicencio (Igual) Linda Guiliana Bautista Gómez (Igual)
Escritura - Preparación del borrador original	José Simón Martínez Castañeda (Igual) Valeria Jazmín Rodríguez Villavicencio (Igual) Linda Guiliana Bautista Gómez (Igual)
Escritura - Revisión y edición	José Simón Martínez Castañeda (Igual) Linda Guiliana Bautista Gómez (Igual)
Visualización	José Simón Martínez Castañeda (Igual)
Supervisión	Linda Guiliana Bautista Gómez (Igual)
Administración de Proyectos	José Simón Martínez Castañeda (Igual) Linda Guiliana Bautista Gómez (Igual)
Adquisición de fondos	Linda Guiliana Bautista Gómez (Igual)